Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.
Cilt 18, No 3, 27-42, 2003

J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.
Vol 18, No 3, 27-42, 2003

İKİ ÖLÇÜTLÜ TEK MAKİNALI ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM

Ertan GÜNER ve Fulya ALTIPARMAK
Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, 06570 Ankara, erguner@gazi.edu.tr, fulyaal@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, en küçük geciken iş kısıtı altında en büyük erken tamamlanma zamanının en küçüklendiği ikincil ölçütlü bir problem dikkate alınmıştır. Bu problem için geliştirilmiş olan dal-sınır algoritmasında çözüm zamanı, problem büyüklüğüne bağlı olarak üstel artış göstermektedir. Son yıllarda, çizelgeleme problemlerin çözümünde global en iyi çözümü bulmada başarılı olan genetik algoritmalar, tavlama benzetimi, tabu arama ve sinir ağları gibi yeni tekniklerin sıkça kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, bu problem için tavlama benzetimi tekniğine dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın performansında çeşitli komşu üretim mekanizmalarının etkileri rassal üretilen test problemleri üzerinde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Çizelgeleme, çok ölçütlü çizelgeleme, tavlama benzetimi

A HEURISTIC APPROACH FOR THE SECONDARY CRITERION SCHEDULING PROBLEM ON A SINGLE MACHINE

ABSTRACT

In this study, the secondary criteria problem that is minimizing the maximum earliness subject to minimum number of tardy jobs has been considered. The solution time of the branch and bound algorithm which was developed for this problem increases exponentially based on problem size. Recently, some techniques such as simulated annealing, tabu search, genetic algorithms, and neural networks have been used often in finding global solution. In this study, an algorithm was developed based on simulated annealing for this problem. The effectiveness of the developed algorithm was evaluated on randomly generated problems by using various neighborhood search strategies.

Keywords: Scheduling, multicriteria scheduling, simulated annealing

1. GİRİŞ

İki veya daha fazla ölçütün yer aldığı çok ölçütlü tek makinalı çizelgeleme problemleri ile ilgili çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır. İki ölçütün yer aldığı çizelgeleme problemlerini; ikincil ölçütlü (secondary criterion) ve iki ölçütlü (bicriteria) problemler olarak sınıflandırmak mümkündür. İkincil ölçütlü problemlerde ölçütler birincil ve ikincil ölçütler olarak ayrılmakta, önce birincil ölçüt eniyilenmekte sonra bu ölçütün bozulmaması kısıtı altında ikinci ölçütün eniyilenmesine çalışılmaktadır. Bu tür problemler, $1//C_2{:}C_1$, şeklinde ifade edilirken C_1 birincil ölçütü, C_2 ise ikincil ölçütü göstermektedir. İki ölçütlü problemlerde ise iki farklı ölçüt C_1 ve C_2 aynı anda en iyilenmeye çalışılmakta, $1//C_2,C_1$, şeklinde gösterilmektedir. Bu en iyileme sonucunda etkin çözümlerin bir seti elde edilmektedir. Litertürde ikincil ölçütlü problemlerle ilgili yapılmış çalışmalar: $1//\sum F{:}T_{max}$ problemi ile ilgli Smith [1], Heck ve Roberts [2]; $1// \sum wF{:}T_{max}$ problemi ile ilgili Burns [3], Miyazaki [4], Bansal [5], Shanthikumar ve Buzacott [6], Posner [7], Bagchi ve Ahmadi [8], Chand ve Schneeberger [9], $1// T_{max}{:}\ n_T$ problemi ile Shanthikumar [10], Gupta ve Ramnarayanan, [11], Gupta ve diğ. [12]; $1//\sum F{:}\ n_T$ problemi ile Emmons [13]; $1//\sum wE{:}\ T_{max}$ problemi ile Chand ve Schneeberger [14]; $1//E_{max}{:}\ n_T$ problemi ile Güner ve diğ. [15], $1//L_{max}{:}\ n_T$ problemi ile Chang ve Su [16] şeklinde sıralanabilir.

Bu çalışmada, en küçük geciken iş (n_T) kısıtı altında en büyük erken tamamlama zamanının (E_{max}) en küçüklendiği ikincil ölçütlü bir problem, $1// E_{max}{:}n_T$, dikkate alınmıştır. Bu problemin çözümü için bir dal sınır algoritması Güner ve arkadaşları [15] tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmanın iş sayısı 30'dan büyük olduğunda hesaplama zamanı açısından etkin olmadığı deneysel çalışma sonucunda gösterilmiştir. Bu nedenle, daha büyük boyutlu problemlerin çözümünü sağlamak için tavlama benzetimi tekniğine dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın performansında çeşitli komşu arama stratejilerinin etkileri rassal olarak üretilen test problemleri üzerinde incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde tavlama benzetimi ile ilgili genel bilgi ve çizelgeleme problemlerine uygulanışı ile ilgili literatür araştırması verilmektedir. Üçüncü bölümde, seçilen ikincil ölçütlü çizelgeleme problemine tavlama benzetimi tekniğinin uygulanması ve kullanılan arama stratejileri incelenmektedir. Dördüncü bölümde, çeşitli üretim mekanizlarının algoritmanın performansındaki etkisini incelemek için yapılan deneysel çalışma ve elde edilen sonuçlar verilmektedir.

2. TAVLAMA BENZETİMİ

Tavlama Benzetimi (TB), kombinatoryal optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan ve katıların fiziksel tavlama sürecini taklit eden bir stokastik arama yöntemidir. Fiziksel tavlama, bir katının düşük enerjili durumlarının elde edilmesi prosesidir. Eritilen katının ısısının çok yavaş düşürülmesi ile katının düşük enerjili durumuna ulaşması sağlanır. Kirkpatrick ve arkadaşları [17] ve Cerny [18] katıların tavlama benzetimi için Metropolis [19] tarafından sunulan metodun optimizasyon problemlerinin çözümünde nasıl kullanılabileceğini göstermişlerdir. Fiziksel tavlama ile kombinatoryal optimizasyon arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Termodinamik Simulasyon		**Kombinatoryal Optimizasyon Problemi**
Sistem Durumları	$\longleftrightarrow$	Uygun Çözümler
Enerji	$\longleftrightarrow$	Amaç fonksiyonu
Durumun Değişimi	$\longleftrightarrow$	Komşu Çözüm
Sıcaklık	$\longleftrightarrow$	Kontrol parametresi
Donma Durumu	$\longleftrightarrow$	Sezgisel Çözüm

Literatür incelendiğinde TB, moleküler fizik ve kimya, tesis yerleşimi, çizelgeleme, bilgisayar ve şebeke tasarımı vb. çeşitli alanlardaki optimizasyon problemlerinin çözümünde uygulandığı görülmektedir.

TB, yerel arama (descent) yöntemlerinin yerel bir minimuma ulaştıktan sonra global minimum için daha fazla arama yapmamasından kaynaklanan eksikliğini gidermeye çalışan bir yöntemdir. TB, bir istisnası dışında yerel arama yöntemindeki aynı temel adımları kullanır: bazen yeni bir çözümün (j) amaç fonksiyon değeri (f(j)) mevcut çözümün (i) amaç fonksiyon değerinden büyük olmasına rağmen (yani $\Delta > 0$, $\Delta = f(j)-f(i)$) yeni çözüm mevcut çözüm olarak kabul edilir ve arama işlemine devam edilir. Daha açık bir ifade ile, $\Delta \leq 0$ olduğunda, j mevcut çözüm olarak kabul edilir. $\Delta > 0$ ise j, $e^{-\Delta/T}$ olasılığı ile mevcut çözüm olarak kabul edilir. T, fiziksel tavlamadaki sıcaklığı gösterir. Genellikle arama işlemine yüksek sıcaklık ile başlanır ve arama işlemi sırasında yavaş yavaş düşürülür. Bu strateji ile aramanın başlangıç aşamalarında amaç fonksiyonunda büyük artışların olduğu yeni çözümler kabul edilirken, aramanın sonuna doğru (sıcaklık sıfıra yaklaşırken) sadece amaç fonksiyonunda iyileşme sağlayan çözümler kabul edilir. Böylece TB, aramanın başlangıç aşamalarında kötü çözümleride kabul ederek arama uzayının çeşitli bölgelerinde aramayı gerçekleştirmekte ve yerel minimuma takılmayı önlemektedir. TB algoritmasının genel yapısı Şekil 1'de verilmektedir.

Her hangi bir problemin çözümünde TB algoritmasının kullanılması için bazı parametrelerin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler: (1) başlangıç sıcaklığı (T_0), (2) her sıcaklıktaki iterasyon uzunluğu, (3) soğutma fonksiyonu, (4) algoritmayı durdurma kriteri. Başlangıç sıcaklığı bir girdi parametresidir. Sıcaklık kötü çözümlerin kabul edilme olasılığını kontrol etmek için kullanılır. İterasyon uzunluğu, her sıcaklıkta üretilen çözümlerin sayısıdır. Soğutma fonksiyonu, bir önceki iterasyon sıcaklığına bağlı olarak mevcut iterasyondaki sıcaklığı belirler. Soğutma oranı r olmak üzere $T_k = r\ T_{k1}$ eşitliği literatürde yaygın olarak kullanılan soğutma fonksiyonudur. Uygulamalarda r değeri genellikle 0.8 ve 0.99 arasında alınmaktadır. Başlangıç sıcaklığı ile birlikte iterasyon sayısı ve soğutma fonksiyonu,

```
Bir başlangıç durumu seç  i∈s;
Bir başlangıç sıcaklığı seç T > 0;
Sıcaklık değişim sayısını sıfırla t: =0;
Repeat
Tekrar sayacını sıfırla n:=0;
    Repeat
        i'nin bir komşusu olan j durumunu üret;
        Δ:= f(j) -  f(i) ;
        if  Δ< 0 then  i := j;
        else if random(0,1) < exp(- Δ /T) then i:=j;
        n:= n+1;
until n= N(t);
  t :=t+1;
T: =T(t);
Until durdurma koşulu
```

Şekil 1. TB Algoritmasının genel yapısı

soğutma çizelgesi olarak adlandırılır. Bu çizelge, çözüm kalitesinde veya yakınsama oranında büyük etkiye sahiptir. Her sıcaklık değişiminde elde edilen çözüm, çok sayıda ardışık sıcaklık değişimlerinde değişmiyor ise TB durdurulur.

Literatürde tek ve çok ölçütlü çizelgeleme problemlerinin çözümüne ait TB uygulamaları Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 1 ve Tablo 2'de verilen çalışmalar, başlangıç çizelgesinin oluşturulması, mevcut çözümden yeni komşunun üretilmesi ve kullanılan kabul olasılık fonksiyonu açısından farklılık göstermektedir. Bu çalışmada, ikincil ölçütlü çizelgeleme problemi için TB'ne dayalı bir algoritma geliştirilmiş ve literatürde mevcut 11 komşu üretim mekanizmasının algoritmanın performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3. GELİŞTİRİLEN ALGORİTMA

Minimum geciken iş kısıtı altında en büyük erken tamamlanma zamanının en

Tablo 1. Tek ölçütlü çizelgeleme problemlerinde TB uygulamaları

	Tek Ölçütlü
Tek Makina	Matsuo, Chang, Sullivan[20], Lin, Haley, Sparks [21] Shapiro, Alfa [22], Crauwels, Potts, Van Wassenhove [23], Ben-Daya, Al-Fawzan [24]
Paralel Mak.	Guinet [25]
Akış Tipi	Osman, Potts [26], Ogbu, Smith [27,28], Zegardi, Itah, Enkawa [29], Ishibuchi, Misaki,Tanaka[30], Parthasarty, Rajendran [31]
Atelye Tipi	Laarhoven, Aarts, Lenstra[32],Krishna, Ganeshan, Ram [33], Mamalis, Malagardis[34], Catoni [35]

Tablo 2. Çok Ölçütlü çizelgeleme problemlerinde TB uygulamaları

	Çok Ölçütlü
Akış Tipi	Gagadharan, Rajendran [36](Makespan ve $\sum F$, ölçütleri)
Paralel Mak.	Park, Kim[37], Torres,Enscore, ve Barton [38]

küçüklenmesi, $1//E_{max}:n_T$, probleminin çözümü için geliştirilen algoritmada kullanılan kabul olasılık fonksiyonu, soğutma çizelgesi, başlangıç sıcaklığının belirlenmesi ve kullanılanlan komşu üretim mekanizmaları bu bölümde anlatılmaktadır.

3.1. Kabul Olasılık Fonksiyonu

İncelenen problem, ikincil ölçütlü problemdir. Bu tür problemlerde öncelikle birincil ölçüt eniyilenmekte, sonra bu ölçütün bozulmaması kısıtı altında ikincil ölçüt eniyilenmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle standart TB'nde kullanılan kabul olasılık fonksiyonunun yeniden düzenlemesi gerekmektedir. Lee ve Wang [39]'ın çok amaçlı sürekli optimizasyon problemi için geliştirdikleri kabul olasılık fonksiyonu bu çalışmada dikkate alınan problem için yeniden düzenlenmiştir. Üretilen yeni bir çözümün mevcut çözüme göre amaç fonksiyonundaki değişim 3 farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlar:

(1) yeni çözümün amaç fonksiyon değerinin mevcut çözüme göre daha iyi olması. Yani $E_{max}\downarrow$, $n_T\downarrow$ ya da $E_{max}\uparrow$, $n_T\downarrow$ (n_T birincil ölçüt olduğundan dolayı),
(2) yeni çözümün amaç fonksiyonlarından birisinin değerinin önceki çözüme göre iyi olmasına rağmen diğerinin daha kötü olması, yani $E_{max}\uparrow$, $n_T\rightarrow$ ya da $E_{max}\downarrow$, $n_T\uparrow$,
(3) yeni çözümün amaç fonksiyon değerlerinin bir önceki çözüme göre daha kötü olması, yani $E_{max}\uparrow$, $n_T\uparrow$.

İlk durumda elde edilen yeni çözüm mevcut çözüm olarak kabul edilir. İkinci ve üçüncü durumda yeni çözümün mevcut çözüm olarak kabul edilme olasılığı 1 nolu eşitlik kullanılarak elde edilir.

$$prob = \exp(-(\Delta_1 J_1 + \Delta_2 J_2)/T) \qquad (1)$$

Burada; Δ_1 *ve* Δ_2 iki farklı ölçütün değişim değeridir. Ölçütler farklı olduğundan

$$J_i = \begin{cases} 1, & \text{eger } \Delta_i > 0, \quad i = 1,2 \\ 0, & \text{eger } \Delta_i \le 0, \quad i = 1,2 \end{cases}$$

dolayı doğrudan kıyaslanması hatalı olur. Yani biri diğerinden çok daha büyük olduğunda, $\Delta_1 + \Delta_2$ değeri her zaman büyük olan değerce bastırılacaktır. Böylece, iki ölçütlü problem, tek ölçütlü probleme çok fazla benzeyecektir. Bu nedenle, ölçütlerdeki değişimi aynı bazda hesaplamak gerekir. Bunu sağlamak için (1) nolu eşitlikteki kabul olasılığı yeniden düzenlenerek amaç fonksiyonlarındaki değişimler değişim yüzdesi olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen yeni kabul olasılık fonksiyonu (2) nolu eşitlikte verilmektedir. Kabul olasılığının bu şekilde hesaplanması ile ölçütlerdeki büyüklük farkı elimine edilmiştir.

$$prob = \exp(- ((\Delta_1/f_1(i))J_1 + (\Delta_2/f_2(i))J_2) /T) \quad (2)$$

3.2. Soğutma Çizelgesi

Bu çalışmada, Osman ve Potts [26] ile İshibuchi ve arkadaşlarının [30] akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümü için TB algoritmalarında kullandıkları, Lundy ve Mees [40] tarafından önerilen soğutma çizelgesi kullanılmıştır. Bu soğutma çizelgesinde belirlenmesi gereken parametre sayısı daha azdır. Aynı sıcaklıkta birçok yeni çözüm üretilmesi ile sıcaklıklar çok yavaş düşürülerek her sıcaklıkta birkaç çözümün üretilmesi arasında çok az farklılık vardır [27,28]. Bu soğutma çizelgesinde, her iki sıcaklık için sistemin denge durumu dağılımları birbirine yakın olacak şekilde ardışık sıcaklık indirgemesi gerçekleştirilir.

Bu çizelgede, başlangıç sıcaklığı (T_0), son sıcaklık (T_K) ve toplam iterasyon sayısı (K), belirlenmelidir. T_k: k. iterasyondaki sıcaklık, r: soğutma oranı olmak üzere her iterasyondaki sıcaklık (3) ve (4) nolu eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$T_{k+1} = T_k /(1 + r.T_k) \quad (3)$$
$$r = [(T_0 - T_K)/ (K-1)\, T_0 T_K] \quad (4)$$

3.3. Başlangıç Sıcaklığı, Son Sıcaklık, Durdurma Koşulu

Başlangıç sıcaklığı (T_0), Kirkpatrick ve arkadaşlarının [17] yaklaşımına dayalı olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımda, büyük bir T_0 değeri seçilir ve önceden belirlenen sayıda çizelge üretilir. Üretilen çizelgelerin kabul oranı (kabul edilen çizelge sayısı / üretilen çizelge sayısı), önceden belirlenen bir değerden küçük ise başlangıç sıcaklığı 2 katına çıkarılır. (5) nolu eşitlikte görüldüğü gibi üretilen çizelgelerin kabul oranı 0.90 olarak alınmıştır.

$$\exp^{\left(\Delta C_{ij} / T_0\right)} = 0.90 \quad (5)$$

T_0, çizelgedeki iş sayısına ve işlerin işlem zamanına bağlı olarak eşitlik (6)'ya göre hesaplandığında yukarıda verilen yaklaşımı da sağladığı görülmüştür. Benzer yaklaşımın, akış tipi çizelgeleme problemi için Osman ve Potts [26] ile Ishibuchi ve arkadaşları [30] tarafından da kullanıldığı görülmektedir.

$$T_0 = (\sum_{i=1}^{n} P_{ij}) / n \tag{6}$$

Bu çalışmada yapılan ön çalışmalar sonucunda son sıcaklık, (T_K), 0.001 olarak alınmıştır. Durdurma koşulu olarak iterasyon sayısı (K) dikkate alınmış ve K, iş boyutuna bağlı olarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$K = \begin{cases} 100N^2 & n \le 100 \text{ ise} \\ 50N^2 & n > 100 \text{ ise} \end{cases}$$

Bu açıklamalar doğrultusunda geliştirilen algoritma Şekil 2'de verilmektedir.

Adım 1. Başlangıç çözümünü, (i), başlangıç sıcaklığını, (Tk), k= 0, seç ve soğutma oranını (r) hesapla.
Adım 2. Komşu üretme mekanizması kullanarak mevcut çözümden yeni çözümü, (j), üret.
$\Delta_1 = f_1(j) - f_1(i)$; $\Delta_2 = f_2(j) - f_2(i)$;
Eğer $\Delta_1 \le 0$ ve $\Delta_2 \le 0$ ise i: =j ;
Eğer $\Delta_1 > 0$ ve $\Delta_2 < 0$ ise i: =j;
Eğer $\Delta_1 > 0$ ve $\Delta_2 > 0$ ise;
$\exp^{-}(\Delta_1 / f_1(i)) + (\Delta 2 / f2(i)))/T$, olasılığı ile i : = j
Eğer $\Delta_1 > 0$ ve $\Delta_2 = 0$ ise;
$\exp^{-}(\Delta_1 / f_1(i))/T$, olasılığı ile i: = j;
Eğer $\Delta_1 \le 0$ ve $\Delta_2 > 0$ ise; $\exp^{-}(\Delta 2 / f2(i))/T$ olasılığı ile i=: j;
Adım 3. $T_{k+1} = T_k / (1 + r T_k)$, k := k+1
k > K ise Dur, değilse 2'ye git.

Şekil 2. Geliştirilen algoritma

4. KOMŞU ÜRETİM MEKANİZMALARI

Bir TB, öncelikle mevcut çözümden yeni çözümü üreten bir komşu üretim mekanizmasının bulunması gerekir. Bu çalışmada, literatürde mevcut bulunan komşu üretim mekanizmalarının arasından 7 tanesinin ve bunların değişik versiyonlarının algoritmanın çözüm kalitesi ve yakınsaması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bölümde bu yöntemler detaylı olarak incelenecektir.

1. **Çiftli Yer Değiştirme (Swap) Mekanizması (ÇYDM):** Bu mekanizmada, mevcut çizelgeden rassal seçilen iş çift yer değiştirirken diğer işlerin pozisyonlarında bir değişiklik olmaz. Mekanizmaya ilişkin örnek aşağıda verilmiştir:

Mevcut çizelge (i)	Rassal seçilen iş çiftleri	Yeni çizelge (j)
{2-3-1-5-4}	3-5	{2-5-1-3-4}

2. **Yerleştirme (insertion) Mekanizması (YM):** Bu mekanizmada rassal seçilen bir iş rassal seçilen bir pozisyona yerleştirilir. Bu mekanizma ile seçilen pozisyona yeni bir iş yerleştirileceğinden dolayı bu ve sonraki pozisyonlardaki işler birer kaydırılır. Mekanizmaya ilişkin örnek aşağıda verilmiştir:

Mevcut çizelge (i)	Rassal seçilen iş	Rassal seçilen pozisyon	Yeni çizelge (j)
{2-3-1-5-4}	2	3	{3-1-2-5-4}

3. **Eniyi Yerel Çiftli Yer Değiştirme (swap-greedy) Mekanizması (EYÇYDM):** Bu mekanizmada rassal seçilen bir iş, diğer pozisyonlardaki işlerle yer değiştirerek (n-1) adet yeni çizelge üretilir ve amaç fonksiyonunu eniyileyen çizelge seçilir [22]. Mekanizmaya ilişkin örnek aşağıda verilmiştir.

Mevcut Çizelge (i)	Rassal seçilen iş	Seçilen iş	Yeni çizelge (j)
{2-3-1-5-4}	1	2	{1-3-2-5-4}
		3	{2-1-3-5-4}
		5	{2-3-5-1-4}
		4	{2-3-4-5-1}

4. **Eniyi Yerel Yerleştirme (insertion greedy) Mekanizması (EYYM):** Bu mekanizmada rassal seçilen bir iş, diğer tüm pozisyonlara yerleştirilerek (n-1) tane yeni çizelge üretilir ve amaç fonksiyonunu eniyileyen çizelge seçilir [22]. Mekanizmaya ilişkin örnek aşağıda verilmiştir.

Mevcut Çizelge (i)	Rassal seçilen iş	Seçilen iş	Yeni çizelge (j)
{2-3-1-5-4}	1	1	{1-2-3-5-4}
		2	{2-1-3-5-4}
		4	{2-3-5-1-4}
		5	{2-3-5-4-1}

5. **Rassal Yerleştirme ve Karıştırma (random insertion perturbation) Mekanizması (RYKM):** Bu mekanizmanın işleyişi kısaca şöyledir: i, mevcut çizelge olsun. Bu çizelgenin ilk pozisyonundaki iş sağ tarafında bulunan herhangi bir pozisyona yerleştirilebilir. Bu durumda, birinci pozisyondaki iş 2 ile n arasında rassal seçilen herhangi bir pozisyona yerleştirilerek yeni çizelge (j) üretilir. Aynı şekilde i çizelgesinin son pozisyonundaki iş sol tarafında bulunan bir pozisyona yerleştirilebilir. Böylece 1 ile n-1 arasında rassal seçilen herhangi

bir pozisyona yerleştirilerek bir başka yeni çizelge (j) üretilir. i çizelgesinin 1. ve n. pozisyonu dışındaki işler sırası ile dikkate alınarak bulundukları pozisyona göre 2 farklı pozisyona yerleştirilir. i çizelgesinin j. pozisyonundaki iş, sol tarafında bulunan 1 ile j-1 arasından rassal seçilen bir pozisyona ve sağ tarafında bulunan j+1 ile n arasında rassal seçilen bir pozisyona yerleştirilerek iki yeni çizelge (j) oluşturulur. Sonuç olarak bu mekanizma ile mevcut çizelgeden 2(n-1) adet yeni çizelge üretilir ve amaç fonksiyonunu eniyileyen çizelge seçilir [31]. Bu mekanizmanın işleyişi ile ilgili örnek aşağıda verilmiştir.

Mevcut Çizelge (i)	Pozisyon Değeri	İş	Rassal Seçilen Pozisyon	Yeni Çizelge (j)
{2-3-1-5-4}	1	2	3	{3-1-2-5-4}
	2	3	1	{3-2-1-5-4}
			4	{2-1-5-3-4}
	3	1	2	{2-1-3-5-4}
			4	{2-3-5-1-4}
	4	5	1	{5-2-3-1-4}
			5	{2-3-1-4-5}
	5	4	2	{2-4-3-1-5}

6. **Eniyi Çiftli Yer Değiştirme (swap best) Mekanizması (EÇYDM):** Bu mekanizmada, çiftli yer değiştirme mekanizmasına göre mevcut bir i çizelgesinden iş sayısı (n) kadar komşu üretilir ve bu komşular arasından amaç fonksiyonunu eniyileyen çizelge seçilir (EÇYDMn). Eniyi çiftli yer değiştirme mekanizması 2n (EÇYDM2n) ve 3n (EÇYDM3n) benzer şekilde mevcut bir i çizelgesinden 2n ve 3n adet komşu üretilir ve bu komşular arasından amaç fonksiyonunu eniyileyen çizelge seçilir [30].

7. **Eniyi Yerleştirme (insertion best) Mekanizması (EYM):** Bu mekanizmada ise araya yerleştirme mekanizmasına göre mevcut bir i çizelgesinden üretilen n adet komşu arasından amaç fonksiyonunu eniyileyen çizelge seçilir (EYMn). Benzer şekilde eniyi yerleştirme mekanizması 2n (EYM2n) ve 3n (EYM3n) de mevcut bir i çizelgesinden 2n ve 3n komşu üretilir. Bu komşular arasından amaç fonksiyonunu eniyileyen çizelge seçilir.

5. DENEY TASARIMI VE SONUÇLAR

Bu çalışmada geliştirilen algoritmanın performansının incelenmesi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, eniyi çözümü bulunabilen küçük boyutlu problemler dikkate alınmış ve komşu üretim mekanizmalarının algoritmanın performansı üzerindeki etkisi, ikinci aşamada ise büyük boyutlu problemler üzerinde rassal arama ve Moore algoritmasına göre geliştirilen algoritmanın performansı incelenmiştir. Bu sonuçlar detaylı olarak incelenmeden önce test problemlerinin üretilmesi ile ilgili kısa bilgi verilecektir.

Test Problemleri:

İşlem zamanları [1-10] aralığında düzgün dağılımdan elde edilmiştir. Teslim tarihlerinin üretiminde ise Fisher'in [41] yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, teslim tarihleri [P(1-τ-R/2),P(1-τ+R/2)] aralığında düzgün dağılımdan üretilmiştir. Bu ifadede τ; gecikme faktörü, R; teslim tarihi aralığı, P; n işin işlem zamanı toplamınıdır (Σp_i).

τ: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve R: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 için toplam 16 kombinasyon, her kombinasyonda 5 farklı problem olmak üzere her iş genişliği (n) için 80 problem üretilmiştir.

Küçük Boyutlu Problemler:

Geliştirilen algoritmada kullanılan komşu üretim mekanizmalarının performansını inceleyebilmek için n = 10, 15, 20, 25, 30 olmak üzere 5 iş grubu dikkate alınmıştır. Her komşu üretim mekanizması ile algoritma her problem için 5 kez denenmiş ve deneysel çalışmada toplam 22000 (=5×5×5×16×11) deneme gerçekleştirilmiştir. Bu problem seti için eniyi çözümler Güner ve arkadaşları [15] tarafından geliştirilen dal-sınır algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bu problemler için eniyi çözümler bilindiğinden dolayı geliştirilen algoritma daha önce belirlenen çözüm sayısına ulaşmadan eniyi çözümü bulduğunda durdurulmuştur. Böylece bilgisayar zamanının gereksiz harcanması önlenmiştir. Komşu üretim mekanizmalarının etkinliğinin incelenmesinde; (1*) ortalama en iyi çözüm sayısı*, (2) *incelenen ortalama çözüm sayısı*, olmak üzere iki performans ölçüsü dikkate alınmıştır. Tablo 3 incelendiğinde, ÇYDM'nin ve bu mekanizmadan elde edilen mekanizmaların performansının her iki performans ölçüsü içinde iyi olduğu görülmektedir. Özellikle 10, 15 ve 20 iş grupları için eniyi ilk beş komşu üretim mekanizması bu mekanizmalardan oluşmaktadır. 25 ve 30 işli işlerde ise ilginç bir sonuç elde edilerek YM'nin yine heriki performans ölçüsü içinde 2. ve 3. sırada yer aldığı görülmektedir. Ancak yine eniyi ilk beş komşu üretim mekanizması içinde ÇYDM'nin ve versiyonlarının ağırlıklı olarak bulunduğu görülmektedir.

Dikkate alınan her iki performans ölçüsü açısından komşu üretim mekanizmaları arasında anlamlı bir farklılığın olup olmadığını belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonucunda, $\alpha = 0.05$ anlamlılık düzeyinde komşu üretim mekanizmaları arasındaki farklılığın istatistiksel anlamlı olduğu görülmüştür. Bu farklılığın hangi üretim mekanizmalarından kaynaklandığını belirlemek için Duncan'ın Çoklu Aralık Testi kullanılmıştır. Bu test sonucuna göre;

a) ÇYDM, EÇYDM, EÇYDMn, EÇYDM2n ve EÇYDM3n yöntemlerinin aralarında istatistiksel anlamlı bir farklılığın olmadığı ve *ortalama eniyi çözüm sayısını* enbüyükleyen mekanizmalar olduğu,

b) ÇYDM, EÇYDM, EÇYDMn, EÇYDM2n, EÇYDM3n, YM ve EYM**n** yöntemlerinin aralarında istatistiksel anlamlı bir farklılığın olmadığı ve *incelenen ortalama çözüm sayısını* enküçükleyen mekanizmalar olduğu görülmüştür.

Varyans analizi sonucunda da ÇYM ve bu mekanizmadan üretilen mekanizmaların iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle çalışmanın devamında hem basit hem de enaz bilgisayar zamanına sahip olan ÇYM dikkate alınmıştır.

τ ve R'nin algoritmanın performansı üzerindeki etkinliği ise 20 işli problem üzerinde incelenmiştir. Tablo 4'te τ ve R arttıkça ve özellikle $\tau = 0.6$, 0.8 ve R = 0.6, 0.8 kombinasyonları ile $\tau = 0.6$ ve R = 0.4 kombinasyonunda ortalama eniyi çözüm sayısının azaldığı görülmektedir. Paralel sonuç incelenen çözüm sayısı için elde edilmiştir. Tablo 5'de görüldüğü gibi aynı kombinasyonlarda algoritmanın incelediği çözüm sayısında hızlı bir artış vardır.

Büyük Boyutlu Problemler:

Büyük boyutlu problemlerde ÇYM'na dayalı olarak geliştirilen algoritmanın performansının incelenmesinde Moore algoritması ve rassal arama dikkate alınmıştır. n = 50, 100, 150, 200, 250 olmak üzere 5 iş grubu ve her iş grubunda 5 farklı problem çözülmüştür. Geliştirilen algoritma ve rassal aramada her problem 5 kez denenmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan $1//E_{max}$: n_T problemidir. Bilindiği gibi Moore algoritması ile sadece geciken iş sayısı enküçüklenir. Bu nedenle öncelikle Moore algoritması kullanılarak her problem için geciken iş sayısı enküçüklenmiştir. İncelemenin birinci aşamasında, geliştirilen algoritma ve rassal arama ile her problem için elde edilen geciken iş sayısı Moore algoritması ile elde edilen geciken sayısıyla karşılaştırılmıştır. Tabo 6'da görüldüğü gibi geliştirilen algoritmada 50 işli grupta 25 denemenin 16'sında, rassal aramada ise 25 denemenin sadece 1 tanesinde Moore algoritması ile aynı sonuç elde edilmiştir. Ancak, problem büyüklüğü arttıkça rassal aramada eniyi çözümler elde edilemezken geliştirilen algoritmada ise eniyi çözümlerin sayısının azaldığı görülmektedir. İkinci aşamada ise Moore algoritması ile elde edilen geciken iş sayısını enküçükleyen çizelgelerin enbüyük erken tamamlanma zamanı, geliştirilen algoritma ve rassal aramada elde edilen çizelgelerin enbüyük erken tamamlanma zamanı ile karşılaştırılmıştır. 50 işli problemde Moore algoritmasındaki enbüyük erken tamamlanma zamanının geliştirilen algoritmadaki enbüyük erken tamamlanma zamanından yaklaşık olarak ortalama %6 ve enfazla %15.34 daha kötü olduğu Tablo 6'da görülmektedir. Bu değer problemin boyutu artıkça azalmaktadır. Diğer taraftan Moore algoritması ile elde edilen sonuçların rassal aramadan daha kötü olmadığı görülmektedir. Sonuç olarak, büyük boyutlu problemler için geliştirilen algoritmanın performansının her iki ölçüt açısından rassal aramadan daha iyi olduğu Moore algoritmasına göre ise maksimum erken tamamlanma ölçütü (E_{max}) açısından daha iyi olduğu söylenebilir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, en küçük geciken iş sayısı altında en büyük erken tamamlanma zamanının enküçüklendiği ikincil ölçütlü tek makinalı bir çizelgeleme problemi incelenmiştir. Bu problemin çözümü için geliştirilen dal sınır algoritmasının iş sayısı 30'dan büyük olduğunda hesaplama zamanı açısından etkin olmadığı ve iş büyüklüğüne bağlı olarak üstel artış gösterdiği deneysel çalışma ile gösterilmiştir. Bu nedenle problem için tavlama benzetimine dayalı sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında, küçük boyutlu problemler için literatürde mevcut komşu üretim mekanizmalarının etkinliği incelenmiş ve çiftli yerdeğiştirme mekanizması ile bu mekanizmadan türetilen mekanizmalar arasında istatistiksel anlamlı bir farklılığın olmadığı varyans analizi sonucu görülmüştür. İkinci aşamada ise, büyük boyutlu problemlerde rassal arama ve Moore algoritması ile çiftli yer değiştirme mekanizmasına dayalı olarak geliştirilen algoritmanın performansı incelenmiştir. Algoritmanın rassal aramaya göre her iki ölçüt açısından, Moore algoritmasına göre ise ikincil ölçüt olan E_{max} ölçütü açısından daha iyi olduğu görülmüştür. Çalışmanın devamında, literatürde bu tür zor problemlerin çözümü için kullanılan genetik algoritmalar, tabu arama yöntemleri gibi diğer sezgisel yöntemler ile geliştirilen algoritmanın performansı karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Smith, W.E., "Various optimizers for single stage production", **Naval Research Logistic Quarterly**, 3, 59-66, (1956).
2. Heck, H., Roberts, R., "A note on the extension of a result on scheduling with secondary criteria", **Naval Research Logistic Quarterly**, 19, 403-405, (1972).
3. Burns, R. N., "Scheduling to minimize the weighted completion times with secondary criteria", **Naval Research Logistic Quarterly**, 23, 125-129, (1976).
4. Miyazaki, S., "One machine scheduling problem with dual criteria", **Journal of Operations Research Society of Japan**, 24 (1), 37-51, (1981).
5. Bansal, S. P., "Single machine scheduling to minimize the weighted sum of completion times with secondary criterion, a branch and bound approach", **European Journal of Operations Research**, 5, 177-181, (1980).
6. Shanthikumar, J. G., Buzacott, J. A., "On the use of decomposition approaches in a single machine scheduling problem", **Journal of Operations Research Society of Japan**, 25, 29-47, (1982).
7. Posner, M. E., "Minimizing weighted completion times with deadlines", **Operations Research**, 33, 562-574, (1985).
8. Bagchi, U., Ahmadi, R. H., "An improved lower bound for minimizing weighted completion times with deadlines", **Operations Research**, 35, 311-313, (1987).
9. Chand, S., Schneeberger, H., "A note on the single machine scheduling problem with minimum weighted completion time and maximum allowable tardiness", **Naval Research Logistic Quarterly**, 33 551-557, (1986).

Tablo 3. Komşu üretim mekanizmalarının ortalama eniyi çözüm sayısı ve incelenen ortalama çözüm sayısına göre karşılaştırılması

	Komşu Arama	Ort. Eniyi Çözüm		Komşu Arama	İncelenen Ort.
	ECYDM	21.8750		ECYDM	1726
	ÇYDM	20.8125		ÇYDM	1959
	ECYDM2n	20.8125		ECYDMn	1981
	ECYDMn	20.7500		ECYDM2n	2249
	ECYDM3n	20.0625		ECYDM3n	2667
10	YM	17.1250	10	YM	3408
	EYM	16		EYMn	3997
	EYM2n	15.8750		EYM2n	4087
	EYMn	15.3750		EYM	4106
	EYM3n	15.2500		EYM3n	4476
	RYKM	14.4375		RYKM	4681
	CYDM	19.4375		CYDM	6022
	ECYDM	19		ECYDM	6980
	ECYDMn	17.9375		ECYDMn	7457
	ECYDM2n	17.6250		ECYDM2n	8451
	ECYDM3n	17.4375		ECYDM3n	9025
15	YM	15.6250	15	YM	9156
	EYM	14.3750		EYMn	10679
	EYMn	14.0625		EYM	10877
	EYM2n	13.5000		EYM2n	11446
	EYM3n	12.5000		EYM3n	12552
	RYKM	11.1250		RYKM	13515
	CYDM	19.9375		CYDM	10827
	ECYDMn	18.5000		ECYDMn	12974
	ECYDM	17.8125		ECYDM2n	15130
	ECYDM2n	17.5000		ECYDM	15745
	ECYDM3n	17.3125		YM	16345
20	YM	15.8125	20	ECYDM3n	16963
	EYMn	14.3125		EYMn	18519
	EYM2n	14.3125		EYM2n	19450
	EYM	13.8750		EYM	21139
	EYM3n	13.1875		EYM3n	21381
	RYKM	10.3750		RYKM	25686
	CYDM	17.7500		CYDM	22754
	YM	15.8750		YM	26420
	ECYDMn	15.8750		ECYDMn	27388
	ECYDM2n	15.3750		ECYDM2n	30726
	ECYDM3n	15		EYMn	31982
25	ECYDM	14.6250	25	ECYDM	32137
	EYMn	14		ECYDM3n	33693
	EYM	13.3125		EYM	35294
	EYM2n	11.8125		EYM2n	37707
	EYM3n	11.3125		EYM3n	39116
	RYKM	6.5625		RYKM	70785
	CYDM	16.9375		CYDM	36674
	ECYDMn	15.2500		ECYDMn	42102
	YM	14.6250		YM	42750
	ECYDM2n	14.4375		ECYDM2n	48108
	ECYDM3n	13.5000		ECYDM3n	53190
30	ECYDM	12.4375	30	EYMn	53896
	EYMn	11.7500		ECYDM	55586
	EYM	11.1875		EYM	56196
	EYM2n	11.1250		EYM2n	56547
	EYM3n	10.8750		EYM3n	58863
	RYKM	6.5625		RYKM	70785

Tablo 4. τ ve R faktörlerine göre 20 işli problemler için ÇYDM'da bulunan eniyi çözümlerin sayısı

		R			
		0.2	0.4	0.6	0.8
τ	0.2	25	25	25	25
	0.4	25	25	25	21
	0.6	25	25	9	10
	0.8	25	6	13	10

Tablo 5. τ ve R faktörlerine göre 20 işli problemler için ÇYDM'da bulunan incelenen ortalama çözüm sayısı

		R			
		0.2	0.4	0.6	0.8
τ	0.2	661	1322	1825	2221
	0.4	1657	1917	2065	8482
	0.6	5769	5463	27487	28838
	0.8	4555	31346	23533	26080

Tablo 6. Büyük boyutlu problemler için sonuçlar

İş Sayısı	50	100	150	200	250
Problem Sayısı	5	5	5	5	5
TB'de nT ölçütünü sağlayan çözüm sayısı	16	11	8	7	6
RA'da nT ölçütünü sağlayan çözüm sayısı	1	0	0	0	0
Moore Çözümlerinin TB'ye göre ortalama hata %	5.493	0.697	0.116	0.086	0.014
Moore Çözümlerinin RA'ya göre ortalama hata %	0	0	0	0	0
Moore Çözümlerinin TB'ye göre maksimum hata %	15.345	2.132	0.584	0.683	0.089
Moore Çözümlerinin RA'ya göre maksimum hata %	0	0	0	0	0

10. Shanthikumar, J. G., "Scheduling n jobs on one machine to minimize the maximum tardiness with minimum number tardy", **Computers & Operations Research**, 10, 255-266, (1983).
11. Gupta, J. N. D., and Ramnarayanan, "Single facility with dual criteria: minimizing maximum tardiness subject to minimum number of tardy jobs", **Production Planning & Control**, 7, 2, 190-196, (1996).
12. Gupta, J.N.D., Hariri, A.M.A and Potts, R., "Single-machine scheduling to minimize Maksimum Tradiness with Minimum Number of Tardy Jobs", **Annals of Operations Research**, 92, 107-123, (1999).

13. Emmons, H., "One machine sequencing to minimize mean flow time with minimum number tardy", **Naval Research Logistic Quarterly**, 22, 585-592, (1975).
14. Chand, S., Schneeberger, H., "Single machine scheduling to minimize weighted earliness subject to no tardy jobs", **European Journal of Operations Research**, 34, 221-230, (1988).
15. Güner, E., Erol S., Tani K., "One machine scheduling to minimize the maximum earliness with minimum number tardy jobs", **International Journal of Production Economics**, 55, 213-219, (1998).
16. Chang, P.C., Su, L.H., "Scheduling n Jobs on One Machine to Minimize The Maximum Lateness with a Minimum Number of Tardy Jobs", **Computers and Industrial Engineering**, 40, 349-360, 2001.
17. Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr., C. D., and Vecchi, M. P., "Optimization by simulated annealing", **Science**, 220, 671-680, (1983).
18. Cerny, V., "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm", **Journal of Optimization Theory and Applications**, 45, 41-51, (1985).
19. Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth,M., Teller, A., Teller, E., " Equation of state calculations by fast computing machines", **Journal of Chemical Physics**, 21, 1087-1092, (1953).
20. Matsuo, H., Chang, J.S., Sullivan, R.S., "A controlled search simulated annealing method for the single machine weighted tardiness problem", **Annals of Operations Research**, 21, 85-108, (1989).
21. Lin, C.K.Y., Haley, K.B., Sparks, C., "A comparative study of both standard and adaptive versions of threshold accepting and simulated annealing in three scheduling problems", **European Journal of Operational Research**, 83, 330-346, (1995).
22. Shapiro, J. A., Alfa, A. S.," An experimental analysis of the simulated annealing algorithm for a single machine scheduling problem", **Engineering Optimization**, 24, 79-100, (1995).
23. Crauwels, H.A.J., Potts, C.N., Van Wassenhove, L.N., "Local search heuristics for single machine scheduling with batching to minimize the number of late jobs", **European Journal of Operational Research**, 90, 200-213, (1996).
24. Bendaya, M., Al-Fawzan, M., "Simulated annealing approach for the one machine mean tardiness scheduling problem", **European Journal of Operational Research**, 93(1), 61-67, (1996).
25. Guinet, A., "Scheduling independent jobs on uniform parallel machines to minimize tardiness criteria", **Journal of Intelligent Manufacturing**, 6(2), 95-103, (1995).
26. Osman, I. H., and Potts C.N., "Simulated annealing for permutation flowshop scheduling," **OMEGA, International Journal of Mgmt Sci.**, 17(6), 551-557, (1989).
27. Ogbu, F. A., Smith, D.K., "Simulated annealing for the permutation flowshop problem", **OMEGA**, 19, 1, 64-67, (1990a).

28. Ogbu, F. A., Smith, D.K., "The application of the simulated annealing algorithm to the solution of the n/m/C_{max} flow shop problem", **Computers & Operations Research**, 17(3), 243-253, (1990b).
29. Zegardi, S.H., Itah, K., Enkawa, T., "Minimizing makespan for flowshop scheduling by combining simulated annealing with sequencing knowledge", **European Journal of Operational Research**, 85(3), 515-531, (1995a).
30. Ishibuchi H., Misaki, S., Tanaka, H., "Theory and Methodology modified simulated annealing algorithms for the flow shop sequence problem", **European Journal of Operations Research**, 81, 388-398, (1995).
31. Parthasarathy, S., Rajendran, C.," A simulated annealing heuristic for scheduling to minimize mean weighted tardiness in a flowshop with sequence-dependent setup times of jobs- a case study", **Production Planning & Control**, 8(5), 475-483, (1997).
32. Van Laarhoven, P.J.M., Aarts, E. H. L., Lenstra, J. K.," Job shop scheduling by simulated annealing", **Operations Research**, 40, 113-125, (1992).
33. Krishna, K., Ganeshan, K., Ram, D.J., "Distributed simulated annealing algorithms for jobshop scheduling", **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, 25(7), 1102-1109, (1995).
34. Mamalis, A.G., Malagandis, I., "Determination of due dates in job shop scheduling by simulated annealing", **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 9(2), 65-72, (1996).
35. Catoni, O., "Solving scheduling problems by simulated annealing", **SIAM Journal on Control and Optimization**, 36(5), 1539-1575, (1998).
36. Gangadharan, R.G., Rajendran, C., "A simulated annealing heuristics for scheduling in a flow shop with bicriteria", **Computers & Industrial Engineering**, 27(1-4), 473-476, (1994).
37. Park, M.W., Kim, Y.D., "Search heuristics for a parallel machine scheduling problem with ready times and due sates", **Computers & Industrial Engineering**, 33(3-4), 793-796, (1997).
38. Ruiz- Torres, A., Enscore, E. E., Barton, R. R., "Simulated annealing heuristics for the average flow-time and the number of tardy jobs bi-criteria identical parallel machine problen", **Computers & Industrial Engineering**, 33 (1-2), 257-260, (1997).
39. Lee, S. S., Wang, H-P.B., "Modified simulated annealing for multiple-objective engineering design optimization", **Journal of Intelligent Manufacturing**, 3, 101-108, (1992).
40. Lundy, M., and Mees, A., "Convergence of an annealing algorithm", **Mathematical Programming**, 34, 111-124 (1986).
41. Fisher, M.L.,"A dual algorithm for the one-machine scheduling problem", **Mathematical Programming**, 11,229- 251 (1976).